

IDENTIFIKASI SESAR GRINDULU DENGAN MEMANFAATKAN METODE GRAVITASI

Hikmatul Maulidah, Arie Realita, Tjipto Prastowo

Program Studi Fisika, Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya

Email: hikmatul.18069@mhs.unesa.ac.id

Abstrak

Sesar aktif merupakan salah satu sumber potensial pemicu gempa tektonik di wilayah selatan Jawa Timur, dimana Pacitan merupakan kabupaten dengan tatanan geologi yang didominasi oleh busur pengunungan selatan. Identifikasi kehadiran dan karakteristik Sesar Grindulu di Kabupaten Pacitan adalah penting sebagai bagian dari studi mitigasi bencana seismik. Proses identifikasi kehadiran dan karakteristik sesar tersebut memanfaatkan metode gravitasi untuk menentukan posisi geografis, orientasi dan tipe Sesar Grindulu. Data penelitian berupa distribusi anomali gravitasi yang diperoleh dari satelit TOPEX dengan beberapa koreksi untuk mendapatkan *Complete Bouguer Anomaly* (CBA). Teknik pemfilteran kontinuitas ke atas diterapkan untuk memisahkan anomali regional dan anomali lokal sehingga bisa digunakan untuk mengetahui orientasi sesar. Teknik *Second Vertical Derivative* (SVD) diterapkan untuk mengetahui lokasi dan tipe sesar. Analisis semua teknik yang diterapkan dalam penelitian ini memberikan kesimpulan bahwa posisi Sesar Grindulu adalah $111,1^{\circ} - 111,3^{\circ}$ BT dan $8,1^{\circ} - 8,2^{\circ}$ LS dengan orientasi arah timur laut-barat daya (NE-SW). Area timur laut identik dengan wilayah utara Kabupaten Pacitan yang didominasi batuan dengan densitas rendah dan diduga memotong jalur utama Sesar Grindulu di perlintasan Sungai Grindulu. Area barat daya identik dengan wilayah selatan Kabupaten Pacitan yang didominasi oleh batuan dengan densitas relatif tinggi karena wilayah selatan Pacitan dipengaruhi oleh aktivitas magmatik busur pengunungan selatan Pulau Jawa. Interpretasi hasil terapan teknik SVD pada 5 *slicing* anomali lokal menunjukkan bahwa Sesar Grindulu merupakan sesar dengan kombinasi tipe turun dan geser. Temuan penelitian ini bermanfaat sebagai kajian potensi bencana dan upaya pengurangan risiko bencana di Pacitan.

Kata Kunci: Pacitan, Sesar Grindulu, metode gravitasi, TOPEX, kontinuitas ke atas, koreksi CBA, SVD

Abstract

Active faults have prompted one of potential sources for tectonic earthquakes in the southern regions of East Java, where Pacitan is a region of interest with a geological setting being dominated by the Java southern mountain arc. Identification of the presence and characteristics of Grindulu Fault in Pacitan is vital for seismic hazard mitigation study. In this study, such identification involved the use of gravity method to determine geographical positions, orientation and faulting type of the Grindulu. The data included gravity anomaly distribution obtained from TOPEX satellites with some local corrections towards Complete Bouguer Anomaly (CBA). A filtering technique called upward continuation was used to separate regional anomaly from local one in order to determine fault orientation. A *Second Vertical Derivative* (SVD) technique was also used to determine the Grindulu locations and faulting type. Analysis of the applied techniques showed that the Grindulu is located at $111.1^{\circ} - 111.3^{\circ}$ E and $8.1^{\circ} - 8.2^{\circ}$ S with its NE-SW direction. We found that the northeast study area is identical to the northern Pacitan dominated by rocks of low-density across the Grindulu at the Grindulu River. The southwest area is dominated by rocks of high-density as the southern region is much influenced by magmatic activity of the southern mountain arc. The results derived from the SVD technique applied to 5 slicings on the local anomaly showed that the Grindulu is a combination of normal and strike-slip faults. The current results are useful for examination of seismic threat potential hence disaster risk reduction in Pacitan.

Keywords: Pacitan, Grindulu Fault, gravity method, TOPEX, upward continuation, CBA, SVD

PENDAHULUAN

Indonesia secara geologis berada pada pertemuan tiga lempeng tektonik, yaitu Lempeng Indo-Australia, Eurasia, dan Pasifik serta mikro-Lempeng Filipina yang memicu kerentanan terhadap bencana geologi (Cummins, 2017; Irsyam *et al.*, 2017; Hutchings and Mooney, 2021). Lempeng Indo-Australia terus bergerak miring menunjam Lempeng Eurasia *over geological time* menghasilkan stres tektonik pada batuan bawah permukaan Busur Sunda, termasuk deformasi fisis permukaan sepanjang wilayah selatan Pulau Jawa (Koulali *et al.*, 2016; Koulali *et al.*, 2017; Fahrudin *et al.*, 2019; Gunawan and Widiyantoro, 2019). Salah satu bukti fisik adalah pegunungan selatan di Pulau Jawa (Setijadji *et al.*, 2006; Smyth *et al.*, 2008; van Gorsel, 2018). Stres tektonik disimpan dalam bentuk energi

potensial elastik yang terakumulasi pada lapisan batuan geologi membentuk sistem sesar lokal. Apabila batas elastisitas terlampaui, maka energi terakumulasi tersebut dilepaskan sebagai radiasi energi seismik melalui kejadian gempa. Fenomena ini membuktikan bahwa zona sepanjang jalur sesar lokal adalah rawan terhadap bencana gempa.

Kehadiran sesar aktif sebagai sumber potensial pemicu gempa tektonik adalah sesuai dengan temuan peningkatan frekuensi dan magnitudo gempa sepanjang jalur sesar di Pulau Jawa (Nugraha *et al.*, 2015; Koulali *et al.*, 2016; Irsyam *et al.*, 2017; Gunawan and Widiyantoro, 2019). Khususnya sepanjang wilayah selatan Pulau Jawa, aktivitas sesar berpotensi memicu gempa tektonik (Saputra *et al.*, 2018; Supendi *et al.*, 2018; Susilo *et al.*, 2018; Cholifah *et al.*, 2020) selain aktivitas zona subduksi dekat

Palung Jawa (Špičák *et al.*, 2007; Cummins, 2017; Irsyam *et al.*, 2017; Hutchings and Mooney, 2021). Apabila dibandingkan dengan penelitian tentang Sesar Cimandiri (Supendi *et al.*, 2018) dan Sesar Opak (Saputra *et al.*, 2018), penelitian tentang Sesar Grindulu (Cholifah *et al.*, 2020) belum banyak dilakukan. Oleh karena itu, penelitian ini melakukan identifikasi kehadiran fisik dan karakteristik Sesar Grindulu dengan jalur yang diduga memanjang dari wilayah selatan sampai utara Kabupaten Pacitan.

Aktivitas seismik Sesar Grindulu dilaporkan pasca gempa 7 November 2019. Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) melaporkan gempa M_w 3,1 pada kedalaman 11 km dengan episenter di darat pada 8,23° LS dan 111,13° BT sekitar 4 km dari pusat kota Pacitan (www.bmkg.go.id). BMKG menyatakan bahwa mekanisme sumber adalah sesar geser dengan arah timur laut–barat daya. Dengan mempertimbangkan populasi penduduk dan lokasi Pacitan yang dilewati jalur Sesar Grindulu, maka risiko bencana yang dipicu kerentanan wilayah Pacitan terhadap potensi bencana seismik perlu untuk direduksi sampai sekecil mungkin. Salah satu upaya pengurangan risiko bencana adalah dengan mempelajari Sesar Grindulu. Pengetahuan yang lebih baik tentang karakteristik Sesar Grindulu bisa menjadi acuan program pencegahan dan penanganan dampak bencana seismik di wilayah Pacitan.

Identifikasi kehadiran dan karakteristik struktur fisis bawah permukaan bisa dilakukan dengan memanfaatkan beragam metode geofisika dan teknik pengamatan serta pengukuran besaran yang relevan (Avila *et al.*, 2016; Arisbaya *et al.*, 2021). Salah satu metode geofisika yang dapat secara efektif digunakan untuk identifikasi kehadiran dan karakteristik struktur fisis bawah permukaan di berbagai belahan dunia adalah metode gravitasi (Barbosa *et al.*, 2007; Essa, 2013; Altinoğlu *et al.*, 2015; Biswas, 2015; Justia *et al.*, 2018; Al-Khafaji *et al.*, 2019; Nurwidyanto *et al.*, 2019; Ming *et al.*, 2021). Beberapa keunggulan metode gravitasi adalah teknis operasi relatif mudah, biaya operasi relatif murah, memungkinkan pengamatan melalui satelit yang bersifat non-destruktif (Maulana and Prasetyo, 2019; Yanis *et al.*, 2019; Julzarika *et al.*, 2020) dan bisa dikombinasikan dengan metode geofisika yang lain untuk mendapatkan pemetaan struktur fisis bawah permukaan yang lebih akurat (Lestari *et al.*, 2019; Dinçer and Işık, 2020). Prinsip dasar penerapan metode ini adalah memetakan anomali gravitasi pada suatu wilayah dan menginterpretasikan pola anomali gravitasi tersebut. Pemetaan anomali gravitasi di Pacitan dan interpretasinya diharapkan bisa mengungkap kehadiran Sesar Grindulu. Hal ini sekaligus sebagai upaya mitigasi yang bermanfaat dalam pengurangan risiko bencana.

METODE

Data penelitian ini adalah data sekunder berupa distribusi intensitas medan gravitasi mengingat pengamatan dan pengukuran melalui survei gravitasi sulit dilakukan. Data diperoleh dari TOPEX, topografi wilayah berupa

Digital Elevation Model–Shuttle Radar Topography Mission (DEM–SRTM), dan peta lembar geologi Pacitan. Pengumpulan data dilakukan dengan cara mengunduh data di laman link https://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get_data.cgi dengan memasukkan input 111,1° – 111,3° BT dan 8,1° – 8,2° LS. Data topografi wilayah DEM–SRTM berupa peta Provinsi Jawa Timur yang diolah menggunakan aplikasi Global Mapper untuk mendapatkan data topografi wilayah yang berguna untuk *terrain correction* (koreksi medan) sehingga diperoleh nilai *Complete Bouguer Anomaly* (CBA). Data berjumlah 309 titik ukur medan gravitasi yang tersebar berupa posisi 3D (*latitude, longitude, elevation*) dan data gravitasi kawasan atau *free air anomaly* (FAA).

Tiga variabel operasional dalam penelitian ini adalah variabel manipulasi, variabel respons, dan variabel kontrol. Dalam hal ini, variabel manipulasi adalah titik-titik koordinat pengukuran di daerah penelitian, di mana titik-titik tersebut merupakan titik-titik yang diperoleh dari hasil perpotongan garis bujur dan lintang dalam daerah penelitian. Variabel respons adalah nilai *free air anomaly* dan nilai elevasi kawasan yang bergantung pada topografi wilayah pada daerah penelitian. Variabel kontrol adalah nilai densitas batuan (rata-rata) di daerah penelitian yang digunakan dalam perhitungan CBA.

Complete Bouguer Anomaly (CBA)

Untuk mendapatkan CBA, maka dilakukan beberapa koreksi. Data FAA dikoreksi menggunakan koreksi Bouguer, dimana diperlukan masukan berupa nilai rata-rata densitas batuan. Dalam hal ini, lapisan batuan diasumsikan homogen dengan densitas rata-rata 1,6 gr/cm³ yang diperoleh melalui metode *nettleton*. Selanjutnya dilakukan koreksi medan dengan bantuan aplikasi Excel, Global Mapper dan Oasis Montaj. Koreksi medan bertujuan untuk mengurangi efek massa topografi wilayah di atas permukaan Bumi yang relatif kasar yang bisa berakibat selisih elevasi yang besar pada kontur lembah dan bukit pada daerah sekitar titik-titik pengukuran. Setelah dilakukan koreksi Bouguer dan medan, maka CBA bisa ditentukan melalui persamaan berikut,

$$CBA = g_{obs} - g(N) + FAC - BC + TC \quad (1)$$

Berdasarkan data CBA tersebut di atas, kemudian dibuat plot peta kontur anomali gravitasi dengan bantuan aplikasi Surfer yang masih mengandung komposisi anomali lokal dan regional yang tercampur. Untuk memisahkan antara anomali lokal dan regional, maka digunakan metode pemfilteran kontinuasi ke atas dengan berbantuan aplikasi MagPick.

Second Vertical Derivative (SVD)

Untuk analisis lebih dalam terhadap tipe sesar dan lokasinya, maka dilakukan analisis dengan menggunakan metode SVD. Penggunaan metode SVD dari data anomali Bouguer memungkinkan untuk memisahkan efek struktur dangkal dan struktur dalam. Setelah dilakukan pemfilteran dengan menggunakan metode SVD kemudian dilakukan

slicing atau irisan di daerah yang terdapat anomali untuk analisis lebih lanjut. Kriteria untuk menentukan tipe sesar adalah sebagai berikut:

$$\text{Jika, } \left[\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial x^2} \right]_{\max} > \left[\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial x^2} \right]_{\min}, \text{ maka sesar turun} \quad (2)$$

$$\text{Jika, } \left[\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial x^2} \right]_{\min} > \left[\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial x^2} \right]_{\max}, \text{ maka sesar naik} \quad (3)$$

$$\text{Jika, } \left[\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial x^2} \right]_{\min} = \left[\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial x^2} \right]_{\max}, \text{ maka sesar datar} \quad (4)$$

Tipe sesar dapat ditentukan melalui grafik SVD yang dihasilkan dengan membandingkan nilai mutlak maksimum dan minimum pada puncak grafik. Sesar normal memiliki nilai puncak maksimum lebih besar dari puncak minimum, sebaliknya sesar naik memiliki nilai puncak minimum yang lebih besar dari puncak maksimum. Sesar geser (mendatar) memiliki nilai yang sama untuk puncak maksimum dan minimum.

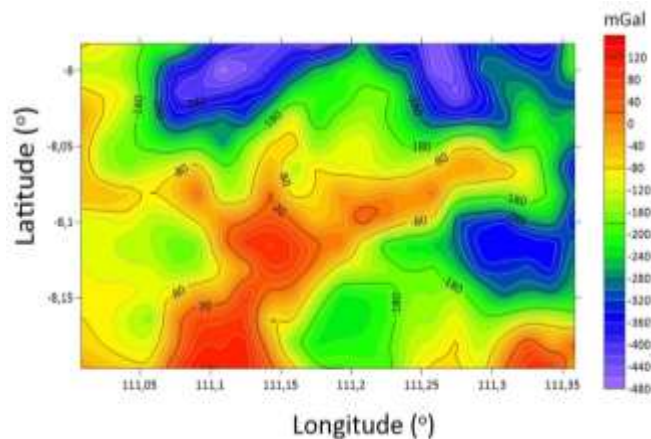
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemaparan hasil-hasil penelitian disajikan menurut urutan produk gambar yang akan dibahas pada bagian ini, yaitu plot: (1) peta kontur CBA dan (2) peta kontur SVD. Kedua peta kontur tersebut bersama dengan plot lain yang relevan digunakan untuk identifikasi kehadiran (posisi geografis sesar) dan karakteristik (orientasi dan jenis sesar) Sesar Grindulu yang menjadi topik bahasan utama dalam penelitian ini.

Peta Kontur CBA

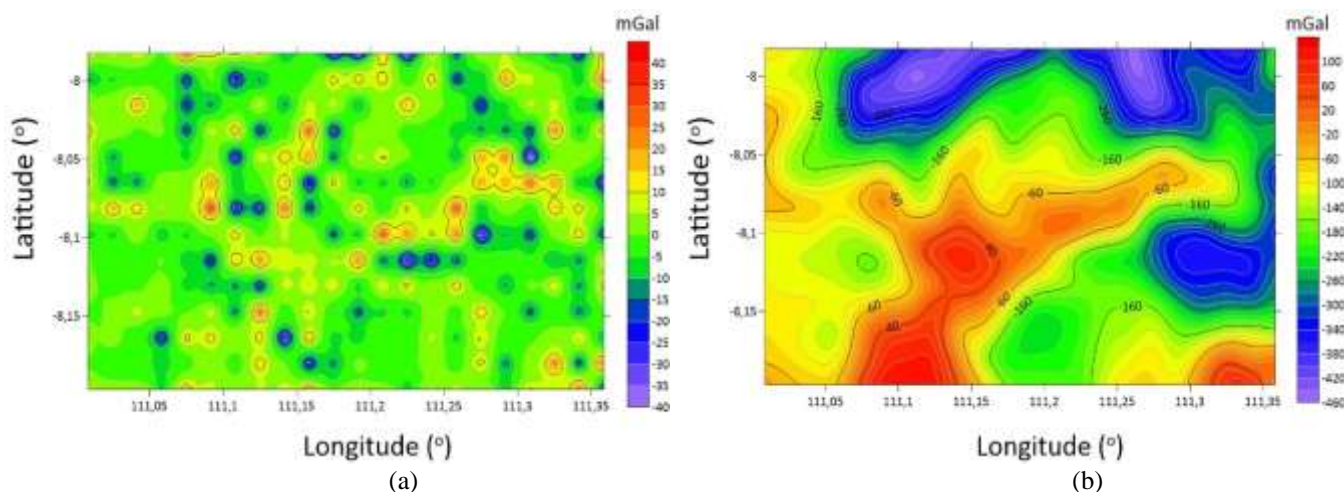
Plot peta kontur CBA untuk cakupan *study area* dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1, dimana data topografi kawasan dan FAA telah dikoreksi dengan koreksi Bouger dan koreksi medan. Anomali gravitasi

terukur berkisar antara -480–120 mGal di daerah penelitian. Variasi nilai anomali gravitasi ditunjukkan dengan adanya perubahan warna kontur dari warna ungu (klosur rendah) hingga merah (klosur tinggi). Secara fisis, klosur tinggi (rendah) menunjukkan distribusi densitas struktur batuan bawah permukaan yang lebih tinggi (rendah) dibandingkan dengan struktur batuan wilayah di sekitarnya (Barbosa *et al.*, 2007; Altinoğlu *et al.*, 2015; Al-Khafaji *et al.*, 2019).



Gambar 1. Peta kontur CBA wilayah penelitian.

Peta kontur CBA ini merupakan akumulasi pengaruh struktur batuan bawah permukaan yang terdiri dari anomali yang disebabkan oleh struktur geologi sumber dangkal, sedang, dan dalam, termasuk struktur fisis yang berdekatan dan saling berinteraksi menimbulkan *overlapping anomaly* seperti yang terlihat pada Gambar 1. Pada situasi seperti ini, analisis terhadap peta kontur anomali gravitasi masih sulit dilakukan. Kesulitan teknis berasal dari anomali lokal dan anomali regional yang masih tercampur. Oleh karena itu, kedua jenis anomali tersebut perlu dipisah.



Gambar 2. Peta kontur anomali: (a) lokal dan (b) regional wilayah penelitian (sesudah pemfilteran kontinuasi ke atas).

Untuk memisahkan anomali lokal dari anomali “lengkap” (regional) yang tumpang tindih pada Gambar 1, maka dilakukan pemfilteran data anomali gravitasi dengan teknik kontinuitas ke atas (Blakely, 1995; Ravat, 2007). Teknik ini dapat memisahkan data anomali gravitasi yang berasal dari kedalaman yang berbeda (Araffa *et al.*, 2018)

dengan hasil akhir berupa pemisahan kontur anomali lokal (Gambar 2a) dan anomali regional (Gambar 2b).

Secara prinsip, teknik pemfilteran kontinuasi ke atas diterapkan melalui proses pemindahan semua titik ukur di daerah penelitian menuju ke suatu titik pada ketinggian tertentu, dimana semua sinyal gelombang pendek telah

dihilangkan (Blakely, 1995; Ravat, 2007). Dengan begitu, heterogenitas sumber anomali dekat permukaan direduksi sekecil mungkin karena tidak diharapkan (Blakely, 1995; Ravat, 2007; Everett, 2013; Ilapadila *et al.*, 2019) sehingga interpretasi hasil akhir pemetaan kontur anomali gravitasi menjadi relatif lebih mudah. Dengan demikian, pemfilteran ini memberi peluang untuk fokus pada daerah sumber yang lebih dalam yang menjadi target penelitian, yaitu Sesar Grindulu. Namun, teknik ini juga bisa digunakan untuk mendeteksi kehadiran sesar minor dari sumber dangkal di sekitar Sesar Grindulu.

Peta kontur anomali lokal (Gambar 2a) merupakan hasil reduksi peta kontur CBA terhadap anomali regional yang disebabkan oleh sumber anomali dangkal, sehingga anomali lokal dapat digunakan untuk menggambarkan struktur batuan bawah permukaan yang lebih spesifik, yaitu yang berada dekat permukaan (Dinçer and Işık, 2020). Gambar 2a menunjukkan kehadiran anomali lokal dengan rentang antara -40 mGal hingga 40 mGal. Temuan tersebut diinterpretasikan sebagai sesar minor dekat permukaan yang berada di sekitar Sesar Grindulu. Temuan ini penting karena kajian tentang Jawa Timur (Koulali *et al.*, 2016; Irsyam *et al.*, 2017) hanya melaporkan dinamika lapisan kerak akibat potensi *back-arc thrusting* di wilayah utara Jawa Timur. Selain itu, lebih banyak terlihat klosur rendah dan tinggi pada peta kontur anomali lokal (Gambar 2a) dibandingkan dengan peta kontur anomali regional (Gambar 2b). Hal ini karena anomali lokal diasosiasikan dengan struktur batuan geologi dekat permukaan.

Gambar 2b merupakan peta kontur anomali regional yang diasosiasikan dengan anomali frekuensi rendah dan panjang gelombang yang besar sehingga dapat menjangkau daerah yang lebih dalam dengan ditandai adanya atenuasi gelombang dimana frekuensi akan terus melemah seiring pertambahan jarak dan waktu (Gupta and Ramani, 1980). Pada Gambar 2b, rentang anomali gravitasi terukur adalah antara -460 mGal sampai 100 mGal, dimana distribusi klosur pada peta kontur anomali regional serupa dengan peta kontur CBA (Gambar 1), namun dengan kehadiran pola penampang klosur yang lebih halus. Hal ini karena anomali regional menggambarkan kedalaman sumber sinyal yang relatif dalam. Daerah dengan klosur rendah pada Gambar 2b ditandai sebagai daerah berwarna biru hingga ungu yang terlihat pada arah timur laut, identik dengan wilayah utara Pacitan. Daerah tersebut diduga diisi oleh batuan bawah permukaan dengan densitas rendah (Cholifah *et al.*, 2020) di sepanjang perlintasan Sungai Grindulu (Agustiningrum, 2018).

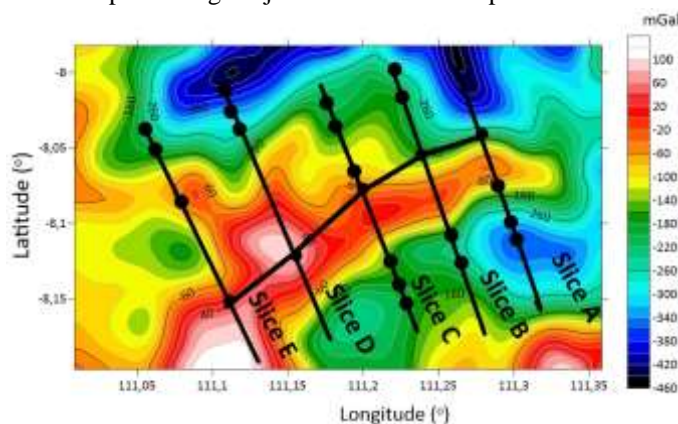
Daerah klosur tinggi ditandai pada daerah berwarna jingga hingga merah terlihat pada arah barat daya. Arah barat daya ini identik dengan wilayah selatan Pacitan yang merupakan bagian dari busur pengunungan selatan Pulau Jawa (Setijadji *et al.*, 2006; Al Hakim and Sulistijo 2013; van Gorsel, 2018). Hasil penunjaman Lempeng Eurasia oleh

Lempeng Indo-Australia adalah struktur bawah permukaan wilayah selatan Pacitan yang banyak diisi batuan vulkanik (Soeria-Atmadja *et al.*, 1994; Smyth *et al.*, 2008).

Temuan variasi klosur tinggi dan rendah sepanjang arah timur laut–barat daya (NE-SW) menunjukkan variasi jenis batuan bawah permukaan di sekitar lokasi penelitian. Secara umum, peta kontur anomali lokal (Gambar 2a) dan anomali regional (Gambar 2b) menunjukkan bahwa jalur Sesar Grindulu adalah sepanjang timur laut–barat daya (NE-SW) sesuai dengan peta geologi Lembar Pacitan (Samodra *et al.*, 1992) dan temuan terdahulu yang relevan (Gultaf *et al.*, 2015; Fahrudin *et al.*, 2019; Cholifah *et al.*, 2020; Arisbaya *et al.*, 2021). Untuk memperkuat dugaan tersebut maka dilakukan analisis lebih lanjut dengan menggunakan teknik SVD.

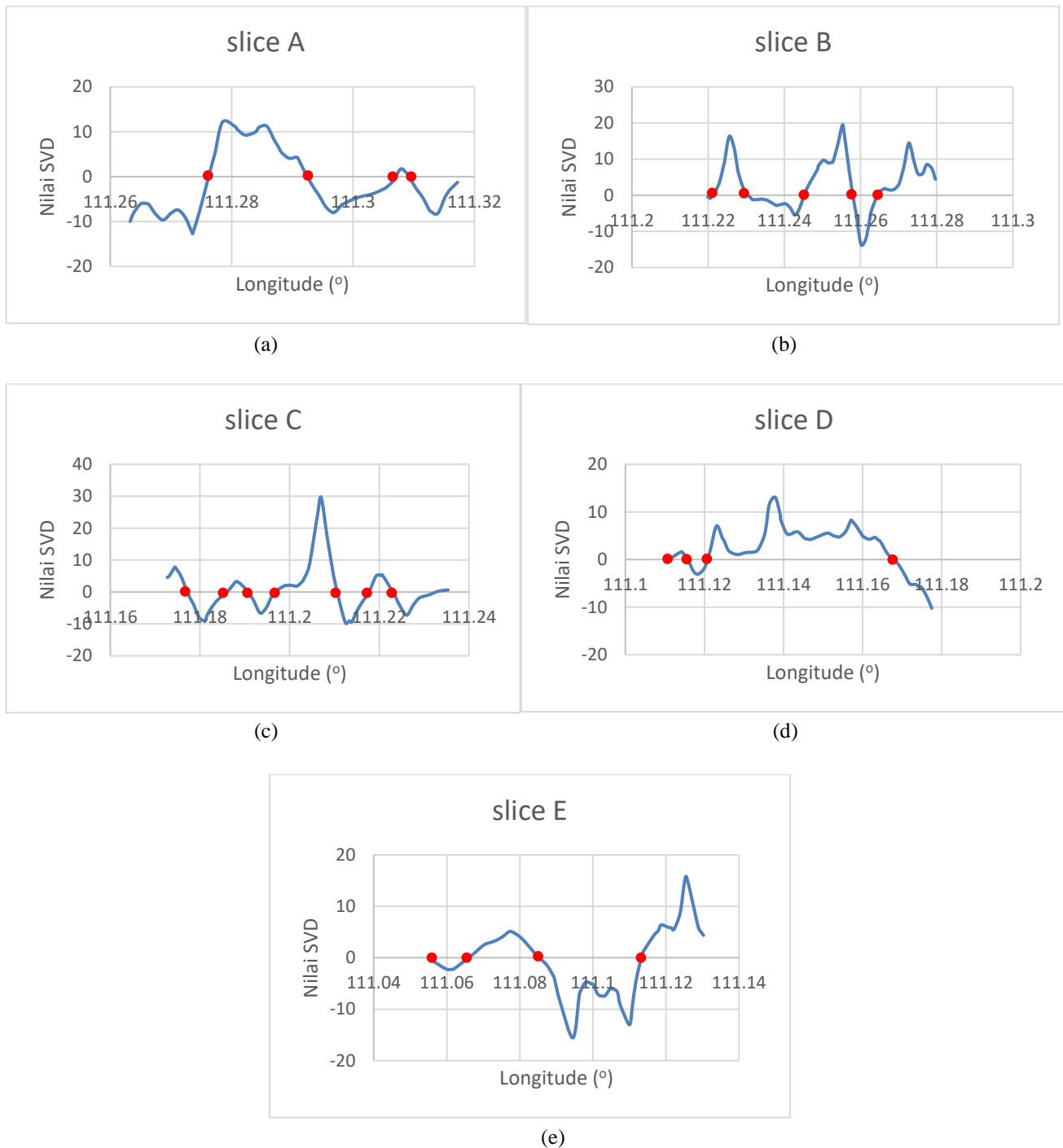
Peta Kontur SVD

Teknik SVD berguna untuk mendeteksi keberadaan struktur patahan dalam perut Bumi. Teknik ini memberikan gambaran batas-batas kontras distribusi densitas dari data anomali residual dengan lebih jelas. Peta kontur SVD yang dihasilkan pada Gambar 3 menunjukkan ada variasi anomali dari tinggi ke rendah pada jarak pendek yang diidentifikasi sebagai sesar. Untuk mengetahui lebih pasti keberadaan sesar tersebut dilakukan analisis grafik SVD (Gambar 4) melalui proses digitasi sebanyak lima sayatan melintang terhadap arah dugaan jalur Sesar Grindulu pada Gambar 3.



Gambar 3. Peta kontur anomali regional dengan SVD.

Kelima sayatan pada Gambar 3 (*slicing* A, B, C, D dan E) untuk menguji dan menentukan kehadiran (posisi geografis sesar dalam batas-batas garis lintang dan bujur) Sesar Grindulu. Kelima sayatan tersebut kemudian diolah dengan bantuan teknik SVD menghasilkan grafik SVD pada Gambar 4. Kelima grafik SVD memberi ilustrasi kehadiran anomali gravitasi yang disebabkan oleh struktur geologi bawah permukaan yang sedang diteliti. Grafik SVD tersebut memiliki nilai maksimum dan minimum serta memotong sumbu vertikal dengan nilai SVD = 0 atau mendekati 0 sebagai indikator struktur geologi bawah permukaan atau posisi geografis Sesar Grindulu (Purnomo *et al.*, 2013; Al-Khafaji *et al.*, 2019; Dinçer and Işık, 2020).



Gambar 4. Grafik hasil 5 *slicing* dengan teknik SVD: (a) slice A (b) slice B (c) slice C (d) slice D (e) slice E.

Gambar 4 menampilkan kelima sayatan berdasarkan teknik SVD, dimana plot SVD dibuat dengan garis bujur sebagai sumbu horisontal (bisa juga garis lintang sebagai sumbu horisontal) dan nilai SVD sebagai sumbu vertikal. Gambar 4a (slice A) menunjukkan 4 posisi geografis yang mungkin menjadi sumber sesar (bulatan berwarna merah). Posisi pertama berada pada koordinat 111,28° BT dan 8,04° LS yang diduga merupakan sesar mayor Grindulu. Posisi kedua, ketiga dan keempat berturut-turut berada pada koordinat 111,29° BT dan 8,08° LS, 111,29° BT dan 8,09° LS serta 111,31° BT dan 8,13° LS yang dianggap sebagai sesar minor. Berdasarkan nilai SVD, slice A menunjukkan

jenis sesar mendatar atau sesar geser karena nilai maksimum sama dengan nilai minimum.

Dengan teknik analisis plot grafik SVD yang sama, Gambar 4b (slice B) menunjukkan koordinat sesar mayor yang terletak pada 111,24° BT dan 8,07° LS dengan jenis sesar turun karena nilai mutlak maksimum lebih besar dari nilai mutlak minimum. Gambar 4c (slice C) menunjukkan koordinat sesar mayor yang terletak pada 111,19° BT dan 8,04° LS dengan jenis sesar turun. Gambar 4d (slice D) menunjukkan koordinat sesar mayor yang terletak pada 111,17° BT dan 8,15° LS dengan jenis sesar mendatar atau sesar geser. Gambar 4e (slice E) menunjukkan koordinat

sesar mayor yang terletak pada $111,11^{\circ}$ BT dan $8,15^{\circ}$ LS dengan jenis sesar turun.

Kontras densitas terlihat sangat jelas untuk setiap sayatan baik slice A, B, C, D maupun E. Setelah dilakukan analisis plot grafik SVD, maka data koordinat *longitude* dan *latitude* yang sudah teridentifikasi sebagai sesar mayor kemudian ditandai pada peta kontur anomali regional yang dibuat dengan bantuan teknik SVD (Gambar 3). Hasil plot memperlihatkan lima titik atau posisi yang jika disambung membentuk jalur sesar yang memiliki orientasi arah dari timur laut–barat daya (NE-SW) dengan rentang koordinat $111,11^{\circ}$ – $111,28^{\circ}$ BT dan $8,04^{\circ}$ – $8,15^{\circ}$ LS. Kehadiran jalur sesar mayor ini merupakan jalur utama Sesar Grindulu yang juga ditandai dengan kehadiran sesar minor di sekitarnya. Temuan orientasi Sesar Grindulu pada penelitian ini sama seperti temuan penelitian terdahulu (Gultaf *et al.*, 2015; Agustyaningrum, 2018; Fahrudin *et al.*, 2019; Cholifah *et al.* 2020).

Hasil teknik *slicing* yang ditunjukkan pada sebagai kelima plot grafik SVD pada Gambar 4 menunjukkan bahwa Sesar Grindulu merupakan kombinasi antara sesar turun (*normal fault*) dan sesar mendatar atau sesar geser (*strike-slip fault*) sesuai dengan klaim penelitian terdahulu berbasis analisis paleostres tektonik batuan dari Gultaf *et al.* (2015). Namun, penelitian terdahulu yang lain (Parera *et al.*, 2015; Yusvinda *et al.*, 2020) melaporkan bahwa Sesar Grindulu merupakan sesar turun sedangkan temuan terdahulu yang lain (Cholifah *et al.*, 2020; Arisbaya *et al.*, 2021) melaporkan sebagai sesar mendatar atau sesar geser. Perbedaan temuan antara tim peneliti satu dengan yang lain membuktikan bahwa masalah penentuan jenis sesar sebagai struktur batuan geologi bawah permukaan yang kompleks membutuhkan metode dan teknik yang terpadu untuk hasil yang lebih akurat.

KESIMPULAN

Penelitian ini bertujuan untuk identifikasi kehadiran dan karakteristik Sesar Grindulu di Pacitan secara kualitatif dengan memanfaatkan metode gravitasi. Data penelitian berupa anomali gravitasi yang dikumpulkan dari satelit TOPEX dan diolah melalui beberapa prosedur standar menggunakan teknik koreksi CBA, filter kontinuasi ke atas, dan sayatan melintang SVD. Hasil analisis menunjukkan bahwa Sesar Grindulu besar kemungkinan berada pada posisi dalam rentang koordinat $111,1^{\circ}$ – $111,3^{\circ}$ BT dan $8,1^{\circ}$ – $8,2^{\circ}$ LS dengan orientasi arah sepanjang garis NE-SW. Area timur laut penelitian berkorelasi dengan wilayah utara Pacitan dan diduga memotong jalur utama Sesar Grindulu di perlintasan Sungai Grindulu. Area barat daya berkorelasi dengan wilayah selatan Pacitan yang banyak dipengaruhi oleh busur pengunungan selatan Pulau Jawa. Analisis plot grafik SVD memberikan petunjuk analitis bahwa jenis Sesar Grindulu merupakan kombinasi antara sesar turun dan geser (sesar mendatar).

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada beberapa pihak atas ketersediaan data penelitian yang diperoleh dari satelit TOPography EXperiment (TOPEX) milik bersama National Aeronautics and Space Administration (NASA), the U.S Govt space agency dan Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), the French space agency. Data tersebut diakses di https://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get_data.cgi yang disediakan the Scripps Institution of Oceanography, UCSD, US. Penulis juga menyampaikan ucapa terimakasih kepada reviewers atas saran dan masukan yang bermanfaat.

DAFTAR PUSTAKA

- Agustyaningrum, L. 2018. *Interpretasi struktur bawah permukaan dan identifikasi jalur sesar mayor Grindulu berdasarkan data anomali medan magnet*. Skripsi, Universitas Jenderal Soedirman: Purwokerto.
- Al Hakim, A. Y. and Sulistijo, B. 2013. Integrated exploration method to determine cu prospect in Seweden district, Blitar, East Java. *Procedia Earth and Planetary Science*, Vol. 6, pp. 64-69.
- Al-Khafaji, W. M. S. and Al-Dabbagh, H. A. Z. 2019. A geophysical correlation between near-surface radioactivity and subsurface faults detected by gravity method for a region located in the western desert of Iraq. *Iranian Journal of Earth Sciences*, Vol. 11, No. 2, pp. 95-103.
- Altinoğlu, F. F., Sari, M. and Aydin, A. 2015. Detection of lineaments in Denizli basin of western Anatolia region using Bouguer gravity data. *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 172, pp. 415-425.
- Araffa, S. A. S., El-bohoty, M., Heleika, M. A., Mekkawi, M., Ismail, E., Khalil, A. and El-Razek, E. M. A. 2018. Implementation of magnetics and gravity methods to delineate the subsurface structural features of the basement complex in central Sinai area, Egypt. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, Vol. 7, No. 1, pp. 162-174.
- Arisbaya, I., Lestiana, H., Mukti, M. M., Handayani, L., Grandis, H., Warsa, and Sumintadireja, P. 2021. Garsela Fault and other NE-SW active faults along the southern part of Java Island. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 789, No. 012065.
- Avila, V. M., Doser, D. I., Dena-Ornelas, O. S., Moncada, M. M. and Marrufo-Cannon, S. S. 2016. Using geophysical techniques to trace active faults in the urbanized northern Hueco Bolson, West Texas, USA, and northern Chihuahua, Mexico. *Geosphere*, Vol. 12, No. 1, pp. 264-280.
- Barbosa, V. C. F., Menezes, P. T. L. and Silva J. B. C. 2007. Gravity data as a tool for detecting faults: In-depth enhancement of subtle Almada's basement faults, Brazil. *Geophysics*, Vol. 72, No. 3, pp. B59–B68.
- Biswas, A. 2015. Interpretation of residual gravity anomaly caused by simple shaped bodies using very fast simulated annealing global optimization. *Geoscience*

Frontiers, Vol. 6, pp. 875–893.

- Blakely, R. 1995. *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*. Cambridge University Press: New York, US. pp. 1-464.
- Cholifah, L., Mufidah, N., Lazuardi, E., Santosa, B. J., Sungkono and Haryono, A. 2020. Identification of the Grindulu Fault in Pacitan, East Java using Magnetic Method. *Jurnal Penelitian Fisika dan Aplikasinya*, Vol. 10, Issue 1, pp. 22-23.
- Cummins, P. R. 2017. Geohazards in Indonesia: Earth science for disaster risk reduction—introduction. *Geological Society of London: Special Publications*, Vol. 441, pp. 1-7.
- Dinçer, B. and Işık, V. 2020. Determination of structural characteristics of Tuzgözü Fault Zone using gravity and magnetic methods, Central Anatolia. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, Vol. 162, pp. 145-174.
- Essa, K. S. 2013. Gravity interpretation of dipping faults using the variance analysis method. *Journal of Geophysics and Engineering*, Vol. 10, Issue 1, pp. 1-7.
- Everett, M. E. 2013. *Near-Surface Applied Geophysics*. Cambridge University Press: New York, US. pp. 1-442.
- Fahrudin, Hidayatullah, A. S. and Maulana, M. J. 2019. Tectonic relationships and structural development between Arjosari, Pacitan, East Java and Tawangmangu, Karanganyar, Central Java. *The 1st International Conference on Geodesy, Geomatics, and Land Administration*, KnE Engineering, pp. 47-56.
- Gultaf, H., Sapiie, B., Syaiful, M., Bachtiar, A. and Fauzan, A. P. 2015. Paleostress analysis of the Grindulu fault in Pacitan and surrounding area in its implication to the regional tectonic of East Java. *Proceedings, Indonesian Petroleum Association*, IPA15-G-059, pp. 1-34.
- Gunawan, E. and Widiyantoro, S. 2019. Active tectonic deformation in Java, Indonesia inferred from a GPS-derived strain rate. *Journal of Geodynamics*, Vol. 123, pp. 49-54.
- Gupta, V. K. and Ramani, N. 1980. Some aspect of regional-residual separation of gravity anomalies in a Precambrian terrain. *Geophysics*, Vol. 45, No. 9, pp. 1412-1426.
- Hutchings, S. J. and Mooney, W. D. 2021. The seismicity of Indonesia and tectonic implications. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, Vol. 22, Issue 9.
- Ilapadila, Harimei, B. and Maria. 2019. Analysis of regional anomaly on magnetic data using the upward continuation method. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 279, No. 012037.
- Irsyam, M. I., Widiyantoro, S., Natawidjaja, D. H., Meilano, I., Rudiyanto, A., Hidayati, S., Triyoso, W., Hanifa, N. R., Djarwadi, D., Faizal, L. 2017. *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017*. Penerbit Pusat Studi Gempa Nasional dan Pusat Litbang Perumahan dan Permukiman, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Kementerian PUPR: Bandung. pp. 1-379.
- Julzarika, A., Suhadha, A. G. and Prasasti, I. 2020. Plate and faults boundary detection using gravity disturbance and Bouguer gravity anomaly from space geodesy. *Journal of Environment and Sustainability*, Vol. 4, No.2, pp. 117-131.
- Justia, M., Hiola, M. F. H. and S. Febryana, N. B. 2018. Gravity anomaly to identify Walanae fault using second vertical derivative method. *Journal of Physics: Theories and Applications*, Vol. 2, No. 1, pp. 34-42.
- Koulali, A., McClusky S., Susilo, S., Leonard, Y., Cummins, P., Tregoning P., Meilano, I., Efendi, J. and Wijanarto, A. B. 2017. The kinematics of crustal deformation in Java from GPS observations: implications for fault slip partitioning. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 458, pp. 69-79.
- Koulali, A., Susilo, S., McClusky, S., Meilano, I., Cummins, P., Tregoning, P., Lister, G., Efendi, J. and Syaifi, M. A. 2016. Crustal strain partitioning and the associated earthquake hazard in the eastern Sunda-Banda Arc. *Geophysical Research Letters*, Vol. 43, pp. 1943-1949.
- Lestari, W., Widodo, A., Warnana, D. D. and Syaifuddin, F. 2019. Earthquake risk reduction study with mapping an active fault at the southern of East Java. *Journal of Physics: Conference Series* 1373, No. 012031.
- Maulana, A. D. and Prasetyo, D. A. 2019. Analisa matematis pada koreksi Bouguer dan koreksi medan data gravitasi satelit Topex dan penerapan dalam geohazard: studi kasus Sesar Palu Koro, Sulawesi Tengah. *Jurnal Geosaintek*, Vol.5, No. 3, pp. 91-100.
- Ming, Y., Niu, X., Xie, X., Han, Z., Li, Q. and Sun, S. 2021. Application of gravity exploration in urban active fault detection. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 660, No. 012057.
- Nugraha, A. D., S. Widiyantoro, H. A. Shiddiqi, M. Ramdhan, Wandono, Sutiyono, T. Handayani and H. Nugroho. 2015. Preliminary results of teleseismic double-difference relocation of earthquakes around Indonesian archipelago region. *AIP Conference Proceedings*, Vol. 1658, Issue 1, 030002.
- Nurwidyanto, M. I., Yulianto, T. and Widada, S. 2019. Modeling of Semarang fault zone using gravity method. *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series* 1217, No. 012031.
- Parera, A. F. T., Bunaga, I. G. K. S. and Yusuf, M. 2015. Permodelan tiga dimensi anomaly gravitasi dan identifikasi sesar lokal dalam penentuan jenis sesar di daerah Pacitan. *Prosiding Seminar Nasional Fisika Universitas Negeri Jakarta (e-Journal)*, Vol. 4, pp. 46-48.
- Purnomo, J., Koesuma, S. and Yuniyanto, M. 2013. Pemisahan anomali regional-residual pada metode gravitasi menggunakan metode Moving Average,

- Polynomial, dan Inversion. *Indonesian Journal of Applied Physics*, Vol. 3, No. 1, pp. 10-20.
- Ravat, D. 2007. Upward and downward continuation. *Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism*, pp. 974-976.
- Samodra, H., Gafoer, S. and Tjokrosapoetro, S. 1992. *Peta Geologi Lembar Pacitan, Jawa*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi: Bandung.
- Saputra, A., C. Gomez, I. Delikostidis, P. Zawar-Reza, D. Sri Hadmoko, J. Sartohadi and M. A. Setiawan. 2018. Determining earthquakes susceptible areas southeast of Yogyakarta, Indonesia – outcrop analysis from Structure from Motion (SfM) and Geographic Information System (GIS). *Geosciences*. Vol. 8, No. 132, pp. 1-31.
- Setijadji, L. D., Kajino, S., Imai, A. and Watanabe, K. 2006. Cenozoic island arc magmatism in Java Island (Sunda Arc, Indonesia): clues on relationships between geodynamics of volcanic centers and ore mineralization. *Resource Geology*, Vol. 56, No. 3, pp. 267-292.
- Soeria-Atmadja, R., Maury, R. C., Bellon, H., Pringgoprawiro, H., Polve, M. and Riadi, B. 1994. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, Vol. 9, No. 1, pp. 13-27.
- Smyth, H. R., Hall, R. and Nichols, G. J. 2008. Cenozoic volcanic arc history of East Java, Indonesia: the stratigraphic record of eruptions on an active continental margin. *The Geological Society of America*, Special Paper 436, pp. 199-222.
- Špičák, A., Hanuš, V. and Vaněk, J. 2007. Earthquake occurrence along the Java trench in front of the onset of the Wadati-Benioff zone: Beginning of a new subduction cycle?. *Tectonics*, Vol. 26, pp. 1-16.
- Supendi, P., A. D. Nugraha, N. T. Puspito and Daryono. 2018. Identification of active faults in West Java, Indonesia based on earthquake hypocenter determination, relocation and focal mechanisms analysis. *Geoscience Letters*, Vol. 5, No. 31, pp. 1-10.
- Susilo, A., Sunaryo, Fitriah, F. and Sarjiyana. 2018. Fault analysis in Pohgajih village, Blitar, Indonesia using resistivity method for hazard risk reduction. *International Journal of Geomate*, Vol. 14, Issue 41, pp. 111-118.
- van Gorsel, J. T. 2018. Bibliography of the geology of Indonesia and surrounding areas: Java, Madura, Java Sea, Ed. 7.0. *Bibliography of Indonesia Geologi*, pp. 1-297.
- Yanis, M., Marwan and Ismail, N. 2019. Efficient use of satellite gravity anomalies for mapping the Great Sumatran Fault in Aceh Province. *Indonesian Journal of Applied Physics (2019)*, Vol. 9, No. 2, pp. 61-67.
- Yusvinda, M. N., Puspitasari, S. W., Wafi, N. M. P., Aziz, K. N., Darmawan, D., Katriani, L., Handayani, N. T. and Wibowo, N. B. 2020. Structure Interpretation Using Gravity Spectral Analysis and Derivative Method in Grindulu Fault, Pacitan, East Java. *Proceedings of the 7th International Conference on Research, Implementation, and Education of Mathematics and Sciences (ICRIEMS 2020)*, Vol. 528, pp. 415-420.